

# 局部磁場による裏波ビード形状の改善効果

## —溶融池磁気制御アーク溶接法の適用拡大に関する研究—

棚原靖、羽地龍志、松本幸礼

これまで、溶融金属の垂れ下がり等を防止するために溶融池磁気制御アーク溶接法をステンレス鋼のTIG溶接に適用し、実験を行ってきた。ステンレス鋼は常磁性体であるため、磁気の変動が少ないことから比較的良好な結果が得られたが、強磁性体である鋼管の溶接においては、溶接物に磁気が流れるなどの磁気変動の影響が大きいことが予想される。そこで、本研究では磁気変動の予測にシミュレーションを導入し、磁気コイルの形状と磁気の流れなどを把握すると共に、実機による確認実験を行った。

実験では、シミュレーションの結果に基づき最適な磁気コイルの先端形状を決定し、SS400に対して確認を行ったところ、漏れ磁束の影響からSUS304溶接時と異なり、電磁力による持ち上げ効果は少ないことが判った。

### 1 はじめに

水道管などの配管材料として利用されている鋼管の一層目の溶接には継ぎ手の信頼性の高さから、TIG溶接が利用されている。しかしながら、溶接時においては、重力による溶融金属の垂れ下がりにより欠陥を生じやすいと同時に、内側からの補修も困難であることから、これらの問題を解決する溶接法が望まれている。

これまで、溶融金属の垂れ下がり抑制については、常磁性体であるオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）に対して、溶融池磁気制御アーク溶接法（以下、ECMP法）を適用し実験を行ってきた。その結果、溶融池に重力とは逆方向の電磁力を発生させることで、垂れ下がり抑制するような磁化電流値を含む適正溶接条件を明らかにしてきた。<sup>1)</sup>

本研究は、鋼管材料として使用される強磁性体である炭素鋼にECMP法を適用し、溶融金属の垂れ下がり抑制できるような、適正溶接条件を見出すことを目的としている。溶融金属に対し、電磁力を効果的に発生させるためには、アークの磁気吹きを抑制するとともに溶融池に局部的に磁場を与える必要がある。また、強磁性体である炭素鋼に関しては漏れ磁束など磁気変動の影響が大きいことも予測される。そこで本報告では、シミュレーションを活用した局部的な磁場を発生させる磁気コイルの形状や溶接部ならびに母材に作用する磁場分布について検討を行うとともに、その結果に基づき溶接実験を行ったので、その結果を報告する。

## 2 溶融池磁気制御アーク溶接法

### 2-1 溶融池磁気制御アーク溶接法の基本概念

ECMP法は、溶接時の電流と電磁石による磁界を利用して電磁力を発生させ、溶融金属の持ち上げ等の制御を行う方法であり、横向姿勢の溶接施工時における溶融金

属の垂れ下がり防止のために真鍋らによって発案されたものである。<sup>2)~4)</sup>

横向き溶接時におけるECMP法の基本原理は、溶接トーチと同軸方向の磁場を与えることで母材と平行な電磁力を発生させ、重力による溶融金属の垂れ下がり抑制するものであるが、本研究で用いる手法では、図1に示すように溶接トーチおよび溶接進行方向に垂直な磁場を与えることで母材に垂直な電磁力を発生させることができる。

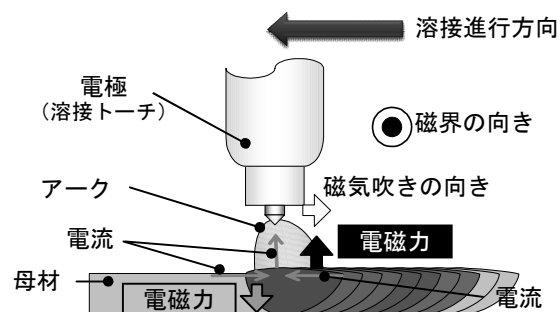


図1 ECMP法による溶接現象の模式図

### 2-2 実験装置の構成

ECMP法を利用した実験装置を図2に示す。本装置は、溶接トーチ部ならびに磁化コイル部、電動スライダ部から構成されている。溶接トーチと磁化コイルは固定されており、電動スライダにより試験片が移動する方式となっている。また、磁化コイルは溶接トーチ側だけでなく、試験片を挟んで溶接トーチと対極に配置することも可能である。

磁化コイルは、鉄心、被覆銅線、上部ヨークならびに下部ヨークから構成されている。図3に詳細図を示す。上部ヨークの形状は溶接トーチと同軸にも配置できるようにコの字型とした。下部ヨーク外側には、オーステナイトステンレス鋼製の倣いローラを取り付け試験片と一

定の隙間 (0.5mm) を保持したまま溶接が行えるような構造となっている。

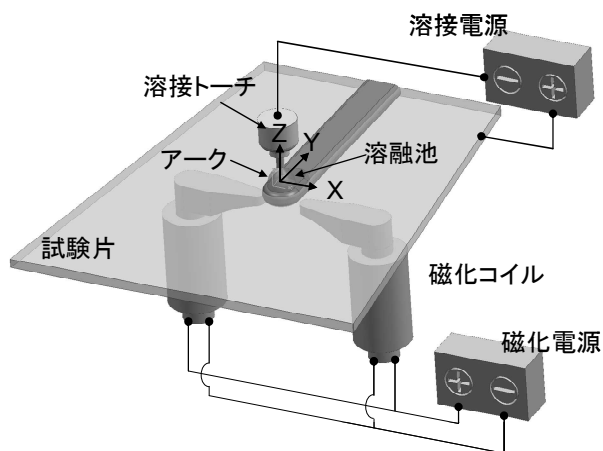
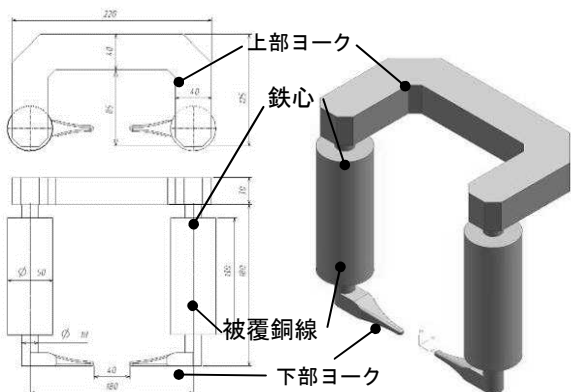


図2 実験装置の構成図



コイル巻き数	160
鉄芯直径	20[mm]
総経路長	940[mm]

図3 磁化コイルの詳細図

### 3 実験方法

#### 3-1 シミュレーションによる磁化コイルの設計・製作

磁化コイルによって与えられる磁場は、溶融池のみならずアークの磁気吹きを引き起こし、強い磁場を与えることで過度な磁気吹きにより、母材に与えられる熱源幅が減少し、結果的に溶接不良となるため、与える磁場はできる限り溶融池に集中させたほうが良い。

磁場を溶融池に局部的に与えるためには、コイルに発生する磁場を効果的に誘導するよう下部ヨーク形状を最適化する必要がある。

そこで、図4に示す下部ヨークの形状4種類について、磁束密度分布の解析を行った。

下部ヨーク形状①は、溶融池に磁場が集中するように先端が細くなっている。下部ヨーク形状②は、下部ヨーク

形状①と似ているが、溶接トーチから磁場の影響を少なくするために試験片から10mm程度離れる形状となっている。下部ヨーク形状③は、鉄心からの磁界の影響を考慮して、先端のみ溶融池に近づくような形状となっている。下部ヨーク形状④は、下部ヨーク形状③と同様に鉄心からの影響を考慮すると同時に、電磁力により持ち上げられた溶融金属が凝固するまで電磁力によって保持出来るような後方に伸びるような形状となっている。

なお、解析には、アドバンスド・サイエンス・テクノロジー社の3D電磁界解析ソフトウェアである「Magnum」を使用した。

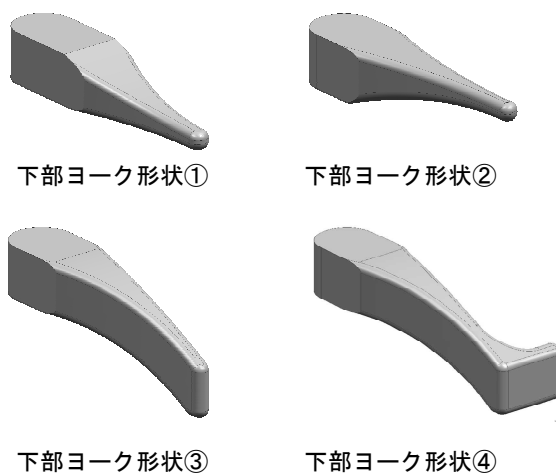


図4 解析した下部ヨーク形状

#### 3-2 磁束密度および磁場（磁束密度）分布の測定

シミュレーションの結果に基づき試作した下部ヨークの磁場発生特性を把握するため、磁化コイルに印加する電流（以下、磁化電流）に対する発生磁束密度および磁場（磁束密度）分布の測定を行うとともに、シミュレーションの結果との比較を行った。

#### 3-3 実験条件

溶接試験片(母材)は板厚3.2mmの一般構造用圧延鋼材 (SS400) を使用した。

その他詳細な実験条件を表1に示す。溶接電流  $I_w=140[A]$ 、磁化電流  $I_c=0, 5, 10[A]$  とし、磁束密度が溶融金属の持ち上げ効果に与える影響を調べた。

なお、実験に際しては、溶込み形成の解析を容易にするため、平板上でのビードオンプレート溶接を行った。

図5には、側面から見た溶接トーチと磁化コイルの配置図を示す。

また、アークと溶融池の挙動を観察するため、赤外線領域を撮影できるよう改良した一眼レフカメラにバンドパスフィルター (970nm) とNDフィルターを装着し、溶接中の撮影を行った。

表 1 実験条件

溶接姿勢	下向き
ルート間隔	0[mm] (ビードなし)
溶接電流 (Iw)	140[A]
溶接速度	2[mm/sec]
シールドガス	Ar:30[l/min]
バックシールドガス	Ar:40[l/min]
アーク長 (Da)	2[mm]
磁化電流 (Ic)	0,5,10[A]
試験片と磁化コイルの間隔 (Dm)	0.5[mm]
電極と磁化コイルの間隔 (Dc)	0[mm]
溶接材料	SS400
試験片寸法	70×300×3.2[mm]

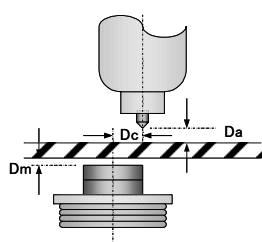


図 5 磁化コイルと溶接トーチの配置図

#### 4 実験結果および考察

##### 4-1 シミュレーションによる磁化コイルの解析結果

図 6 にシミュレーションモデルを示す。モデルは、上部ヨーク、鉄心、磁化コイル、下部ヨーク、試験片となっている。

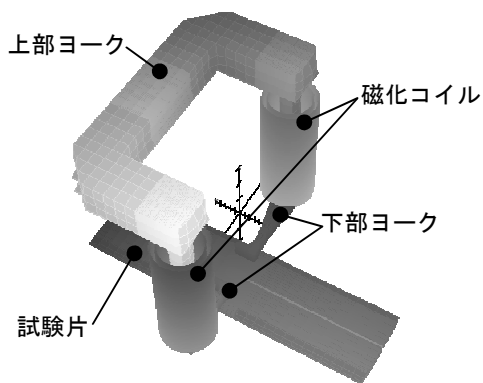


図 6 解析モデル

表 2 解析条件

銅線直径	1.5mm
コイル巻き数	160
印加電流 [A]	10 [A] (片側5 [A])
比透磁率 (ヨーク)	2000
〃 (鉄心)	2000
〃 (試験片)	2000
空気	1

図 7 に、Z軸方向の解析結果を示す。下部ヨーク形状

①は溶接トーチ側と磁化コイル側ほぼ軸対称となっているが、それ以外の下部ヨーク形状は磁気コイル側にシフトしている。

次に図 8 の Y 軸方向の解析結果では、下部ヨーク形状④以外は、溶接トーチを中心として溶接方向の前後で軸対称となっている。

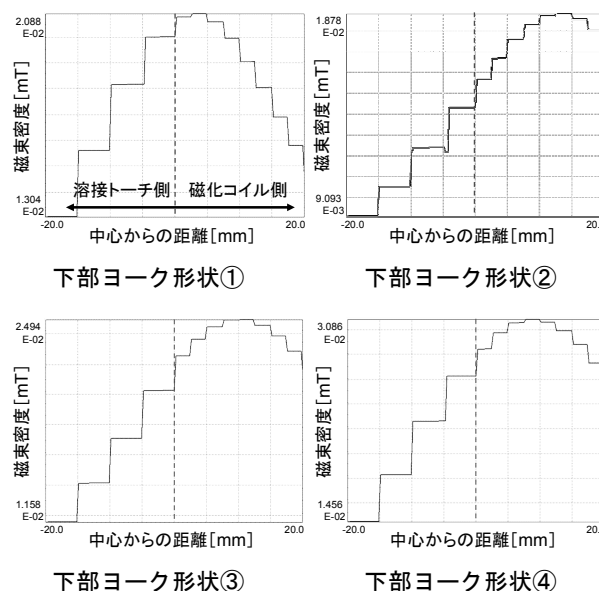


図 7 Z軸方向の磁束密度分布

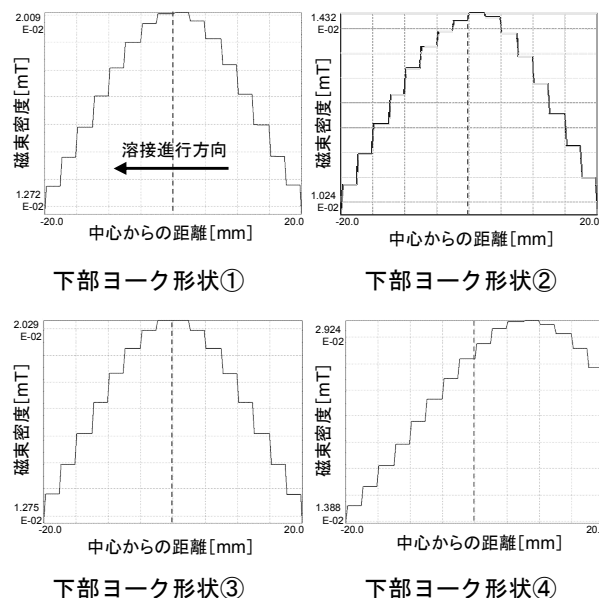


図 8 Y軸方向の磁束密度分布

これらの解析結果から、最適な下部ヨーク形状は、アークへの磁場の影響を抑制し、かつ熔融池後部まで磁場を保持できることが可能な下部ヨーク形状④に決定し、製作した。製作した下部ヨークの寸法ならびに写真を図 9 に示す。

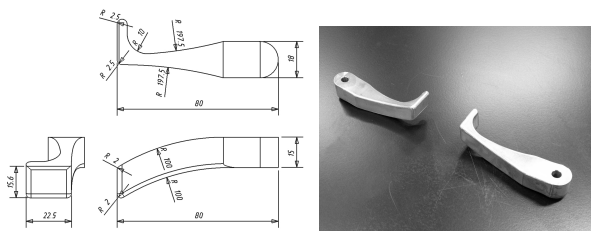


図9 決定した下部ヨーク形状

#### 4-2 磁束密度および磁場（磁束密度）分布の測定

##### 4-2-1 磁化電流を変化させたときの磁束密度の測定

試作した下部ヨークの磁場発生特性を把握するため、磁化コイルに印加する電流（磁化電流）と発生する磁場（磁束密度）の関係を調べた。その結果を図10に示す。

磁化電流の増加に伴い、磁束密度も増加している。磁場分布の傾向はいずれの磁化電流においても、同様な傾向を示しており、磁化電流が高いほど、極大値までの変化率が高くなる傾向にあることがわかる。

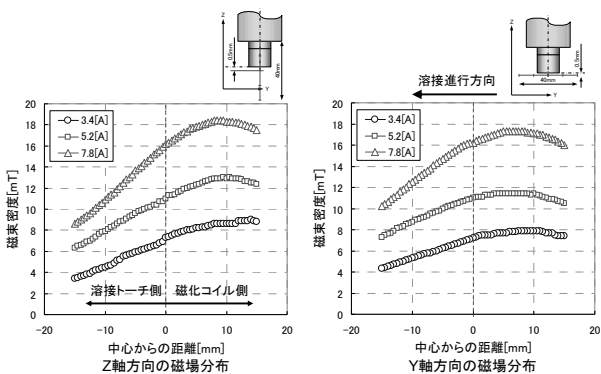


図10 磁化電流を変化させた場合の磁場分布

##### 4-2-2 シミュレーションとの比較

次に、磁化電流 $I_c=5[A]$ 印加時における磁場分布と解析結果を比較した結果を図11に示す。磁化コイル製作時の損失等により若干の値の低下が見られるものの、Z軸方向、Y軸方向共に同様な傾向を示していることから、シミュレーションが下部ヨーク形状の設計に活用できるものと考えられる。

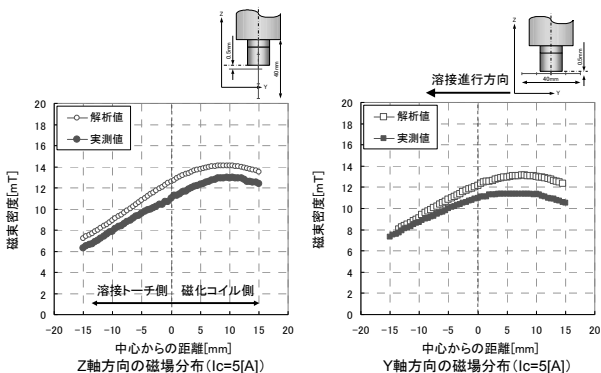


図11 実測した磁場分布と解析結果との比較

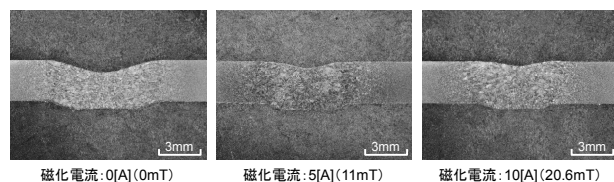
#### 4-3 溶接実験

##### 4-3-1 断面写真

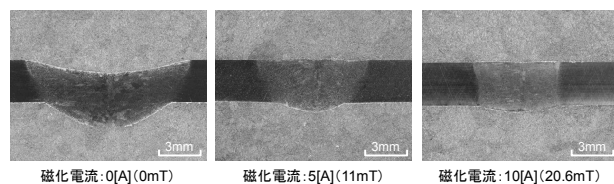
磁化電流を変化させた場合の断面マクロ写真を図12に示す。

強磁性体であるSS400では、磁化電流 $I_c=0[A]$ 時の試験片上面の凹みが、磁化電流の増加とともに減少しているが、磁化電流 $I_c=10[A]$ 時においても凹みは解消されきつてはいない。これに対して、常磁性体であるSUS304では、磁化電流 $I_c=0[A]$ のときはSS400と同様に試験片表面に大きな凹みが生じているが、磁化電流 $I_c=5[A]$ 時には、試験片上面が凸形状となっている。なお、磁化電流 $I_c=10[A]$ 時の試験片上面は平坦となっているが、これは、磁気吹きによりアークの偏向が過大となり、結果的に熱源が溶融池後方に移行したためである。

図13には、ビード幅およびビード高さの測定結果を示す。SS400のビード高さは磁化電流 $I_c=5[A]$ において $H_a=0.1[mm]$ となり、その後は減少に転じていることから磁化電流 $I_c=5[A] \sim 10[A]$ の間に極大値となる磁化電流が存在することが示唆されるが、SS400においては、磁化電流 $I_c=10[A]$ においても増加傾向にあることから、持ち上げ効果を得るには、磁化電流をさらに増価させる必要があるものと思われる。

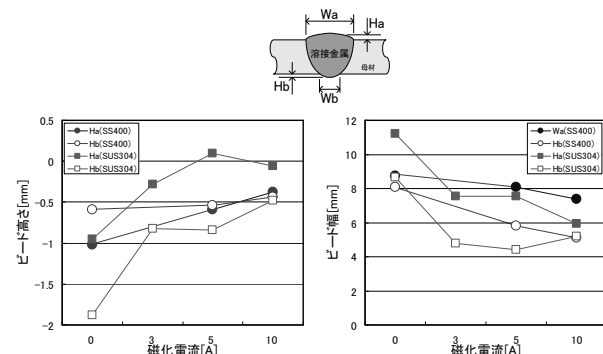


SS400溶接時の断面写真



SUS304溶接時の断面写真

図12 磁化電流を変化させた場合の断面写真



a) ビード高さ

b) ビード幅

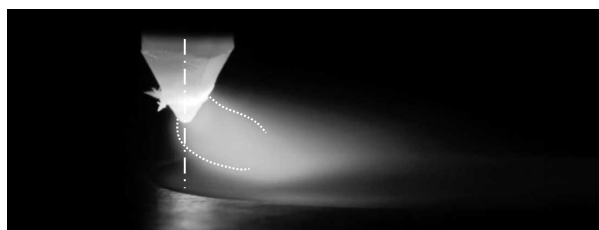
図13 ビード高さとビード幅の変化

### 4-3-2 アークの挙動

4-3-1の結果より、SS400に対しては電磁力の効果がSUS304に対して少なかったことから、アークの挙動を比較した結果を図14に示す。SUS304は磁化電流 $I_c=5[A]$ 時、SS400は磁化電流 $I_c=10[A]$ 時と比較したものであるが、SS400溶接時における磁気吹きのアーク偏向角は、SUS304溶接時の倍の磁化電流を印加しているにもかかわらず、偏向角が小さくなっているのがわかる。このことは、試験片裏側の磁化コイルから発生する磁束が強磁性体であるSS400にも流れ込み（漏れ磁束）、結果的に溶接トーチ側の磁場を抑制したものと考えられる。



SS400溶接時のアークの挙動 ( $I_c=10[A]$ )



SUS304溶接時のアークの挙動 ( $I_c=5[A]$ )

図14 アーク挙動の比較

### 4-4 シミュレーションによる磁場解析

これまでの結果より、SS400溶接時における磁場特性は、SUS304溶接時と大きく異なることから、再度解析を行うために、溶融池やルート間隙を別モデル化し、個別にキュリー温度を考慮した比透磁率を与えられるようシミュレーションモデルを再考した。試験片表面部の磁場分布の解析結果を、図15に示す。

これより、空気中における溶接部（白○部）の磁束密度は約 $10[mT]$ であるのに対し、強磁性体であるSS400の溶接部の磁束密度は約 $2.2[mT]$ となっており、空気中の約 $1/5$ 程度の磁束密度となっている。このことは、溶融池周りの強磁性領域に磁束が回り込み、溶融池内の磁束の流れが変動したものと推測される。

## 5 まとめ

本研究では、ECMP法を活用したTIG溶接における裏波ビードの改善方法として、磁気変動の予測にシミュレーションを導入し、磁気コイルの形状と磁気の流れなどを把握すると共に、実機による確認実験を行った結果、以下の結論を得た。

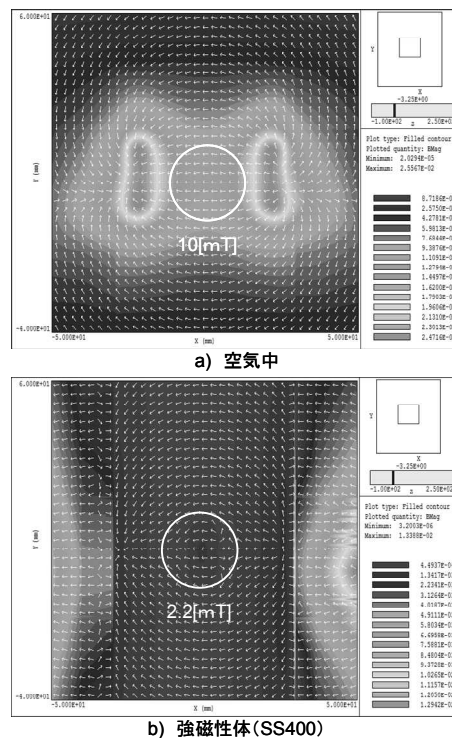


図15 磁場分布の解析結果

- 1) 溶融金属部後方に対して、局所的な強い磁場を発生させるため、幾つかの磁極先端形状について解析を行い最適な磁極先端形状を決定した。
- 2) 決定した磁極先端形状を製作して磁場分布を計測し、解析結果と比較したところ、磁束密度の値は若干下回ったものの、分布傾向は解析結果とほぼ一致していた。
- 3) 新しい磁極先端を用いて強磁性体材料であるSS400について溶接実験を行ったところ、漏れ磁束の影響からSUS304溶接時と異なり、電磁力による持ち上げ効果は少なかった。
- 4) 溶接実験の結果から、解析条件を見直すため、テストピースを溶融池や開先の隙間等を個別にモデリングし、溶融金属部については、キュリー温度を考慮した比透磁率を設定したところ、空気中と比較して溶融金属部の磁束密度が $1/5$ 程度に低下する結果となった。

磁化電源の発生電流限界のため、現在使用中の磁化コイルでは溶融金属の持ち上げ効果が得られるような磁束密度を発生できないことから、コイルの巻数を増やすなどした新たな磁化コイルの製作が必要である。

今後は、新たな磁化コイルを製作するとともに、同コイルを用いた溶接実験を行い最適な溶接条件を見出す予定である。

本研究は平成25年度沖縄県産業振興重点研究推進事業の「局部磁場による裏波ビード形状の改善効果 — 磁性材料への適用 — (2012技008)」で行ったものである。

#### 参考文献

- 1)松田昇一，真鍋幸男，玉城光輝，棚原靖，松本幸礼，又吉勇介：“熔融池磁気制御溶接法の適用拡大に関する研究”，溶接学会論文集，Vol.30(2012)，No.2，116-124
- 2)真鍋幸男，和田宏一，銭谷哲，広本悦己，小林泰幸：“熔融池磁気制御溶接法の基本概念と可能性の検討”，高温学会誌，Vol.25(1999)，No.1，38-45.
- 3)真鍋幸男，和田宏一，銭谷哲，若元郁夫，小林泰幸：“熔融池磁気制御横向TIG溶接法の研究”，高温学会誌，Vol.25(1999)，No.5，211-218.
- 4)真鍋幸男，和田宏一，銭谷哲，広本悦己，橋本安之：“熔融池磁気制御手法を用いた2ワイヤ式横向姿勢TIG溶接法の研究”，溶接学会論文集，Vol.18(2000)，No.1，40-50

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。